

超 临 界 参 数 锅 炉

(第 一 辑)

上 海 锅 炉 厂

目 录

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 超临界参数锅炉综述(代序)..... | 1 |
| 日本超临界直流锅炉..... | 6 |
| 联邦德国发展超临界参数锅炉动向分析..... | 65 |
| 第二代直流锅炉..... | 90 |
| 未来一代的燃煤电厂..... | 96 |
| 燃用硬质煤的2200吨/时蒸汽锅炉的设计与运行经验..... | 106 |
| 变压运行火力发电厂的特点和运行结果..... | 117 |
| 大容量变压运行超临界直流锅炉的设计..... | 134 |
| 变压运行直流锅炉的经验及发展..... | 148 |
| 变压运行超临界锅炉的设计..... | 157 |
| 高参数燃用硬煤的电站锅炉..... | 172 |
| 大容量高参数烧烟煤蒸汽锅炉的设计与结构特点..... | 183 |
| 高温高压两次再热直流锅炉的可行性研究..... | 194 |
| 中间负荷运行超临界垂直水冷壁直流锅炉的设计研究..... | 237 |
| 螺旋管圈式直流锅炉水冷壁的结构模拟分析..... | 274 |
| 广野发电厂2号机组本生锅炉的运行经验..... | 283 |
| 垂直膜式水冷壁管屏间许用温差的试验及计算研究..... | 295 |
| 超临界压力锅炉膜式水冷壁中温度应力的研究 及管间许用温度..... | 301 |
| 接近临界压力时内螺纹管的传热特性..... | 309 |
| 在半圆周受热面中超临界压力水的强制对流传热..... | 318 |
| 变压运行超临界直流锅炉启动旁路系统的设计..... | 331 |
| 超临界压力安全阀..... | 341 |
| 大型燃煤电厂的综合数字控制系统..... | 354 |

超临界参数锅炉综述

(代序)

国民生产总值是随着能源的增长才能提高的。电力是最重要的一种能源。它属于“高品位能”，可以方便地转换成其它各种形式的能源，转换的效率高。电线通到那里，那里就有动力、热能、照明，各式各样的电子设备就能动起来。电力能不断提高劳动生产率、改善生产劳动条件、提高经济效益和改善人民的生活水平。还由于微电子技术的进展，它提供了人类不可估量的发展前景。所以生产与生活是离不开电的，但我国竟有三分之一以上的地区还没有用上电，全国范围内由于严重缺电，使国民收入减多了约20%。

1980年我国电力的81%是由常规火电供应的。到2000年估计常规火电仍将供应总发电量的70%，是我国发电的主流。我国水力资源虽然很丰富，应优先发展，但限于周期长、投资大，在2000年以前，水电比重很难达到总发电量的30%，其它如核电、蒸汽燃气联合循环、磁流体发电等，虽有其优越性，世界上正在大力发展或正在研究发展，但在2000年以前，它们在我国发电量中所能占的比重现实上不可能很大。因此，要保证2000年时我国工农业总产值翻两番和人民生活达到小康水平，则更快、更好、更省地发展常规火力发电设备便是当前我国战略性的根本任务，不能不重点抓好。

世界范围内电站燃料以煤代油已是大势所趋，随着燃料价格的不断上涨，燃料品质日益下降，国际上要求火力发电设备具有更高的经济性、可靠性和对燃料与负荷经常变化的适应性，因此超临界参数变压运行大容量火力发电机组在各国越来越受到重视和得到发展。国外工业发达国家核电容量已占总发电量的10~40%，但还是这样重视发展超临界火电机组，以常规火电作为发电主流我国，不重视这种世界上早已成熟的超临界机组是不符合逻辑的。为此，上海锅炉厂厂刊《锅炉技术》近几年来连续报道了不少有关这方面的国外情况和论述，现在又特地编写这本《超临界参数锅炉》(第一辑)，以提供信息，供有关领导和设计、研究、电力部门的专业工程技术人员参考，目的是希望能促使超临界机组在我国能早日顺利大发展，为我国在2000年完成宏伟目标提供先决条件。

国际上第一台试验性超临界锅炉，是由移居英国的捷克人本生在1919年提出专利方案而在1923年由德国西门子公司建成的，其参数是225大气压，主汽温度400℃，一次再热汽温为350℃，容量为4.5吨/时，水冷壁管由五根螺旋回绕的管圈所构成，燃料为油。本生一开始便采用临界参数。他认为在临界点附近，水和蒸汽的比容相近，蒸发潜热为另，基本上无双相流体，水动力特性好，可避免处理蒸发受热面设计上的困难。限于当时的材料和工艺水平，该台锅炉的制造质量较差，机组的热效率只达到23.3%，但却为后来西门子公司发展直流锅炉和世界上采用超临界发电机组开创了一条新路。

早在30年代至50年代，德国、美国、苏联相继建立了10台左右超临界压力直流锅炉试验台，日本的试验台建立得较晚，第一台是1960年建立的，一般参数在350大气压、600℃左右。他们竟向超临界锅炉进行试验研究，其吸引力是：

- (1) 超临界火力发电机组的热效率高；
- (2) 超临界压力水和蒸汽比容相同、状态相似，所以是单相的，其流动特性稳定，没有汽水分层和在中间集箱处分配上不均匀困难；
- (3) 单相流体阻力比双相的低；
- (4) 超临界压力工质的导热系数 λ 和比热 C_p 较亚临界工质的高；
- (5) 超临界压力工质的比容较小，管道的内径较亚临界压力的小，因此，虽然压力提高了，在使用相同的材料与许用应力条件下，超临界压力机组的管道与汽缸并不比亚临界的重；
- (6) 超临界压力直流锅炉没有笨重的厚壁汽包，没有下降管，水冷壁管也较细，降低了重量与成本；对于缺乏厚钢板，重型制造设备、运输设备、安装设备的国家是有利的。

这些优点吸引着进取心较强的国家，如美国、苏联、德国、日本，大踏步向前发展超临界发电机组。从50年代到60年代不到15年的时间内，全世界共制造了一百余套超临界机组，仅美国的B & W公司一家，自从1957年投运了第一台超临界机组后，到1974年的17年间共制造并投运大容量超临界机组71套，平均每台机组容量为63.6万千瓦，(最大机组为130万千瓦)，每年制造266万千瓦。

美国是发展超临界机组较早和较快的国家，第一台超临界发电机组是非罗电站的第6号机组，1953年订货，1957年3月投运，容量为12.5万千瓦，压力为315大气压，主汽温度为621℃，两次再热温度为565℃/538℃。1960年又投运了一台更先进的艾迪斯顿电站1号机组，容量为32.5万千瓦，参数为352大气压、649/566/566℃，最佳汽耗达1692大卡/度。到1980年为止，已投入运行的超临界机组共有172套，大多数机组的参数为246大气压、538℃/538℃。由于没有能等待早期的超临界机组进行慎重的试验研究、得出经验、进行总结，便开始设计更新更大的锅炉，使一般炉膛的热负荷偏高；环保条例的严格执行，又迫使锅炉不得不燃用低硫的但是易结焦的煤种，这两种因素便造成超临界直流锅炉的事故率较高；再加核电比重的增长，迫使大容量火电机组不得不带中间负荷运行，而美国的直流锅炉结构是不能适应滑压变负荷运行和经济、快速启停的。这些因素对第一代的直流锅炉影响大，而对自然循环汽包锅炉的影响则较小，故美国的超临界发电机组订货从60年代占全年电站机组总容量的50%以上突然下降到70年代10%的水平。亚临界参数的自然循环或辅助循环锅炉反而受到美国用户的普遍欢迎了。不过，提高火电站热效率是美国研究部门、制造厂和电力部门的大方向，他们鉴于苏联、日本的超临界机组的继续发展，通过1978年共同组织调查研究，明确了美国超临界机组可靠性差的原因与超临界压力或两次再热本身并无直接关系，美国设计、制造、运行较好的超临界机组，包括130万千瓦和两次再热的机组，其可靠性并不比汽包锅炉差，同时最近美国的多数锅炉制造厂已经采用西德的能适应滑压运行和较宽广劣质煤燃烧的本生锅炉炉型，消除了美国超临界压力机组不受欢迎的因素，并准备进一步提高压力，分阶段制造和发展316~350大气压、566~650℃的气温和两次再热的变压运行超临界机组，以适应燃料价格的不断上涨和承担中间负荷机组的任务。但美国目前国内的电力工业衰退，总的订货很少，影响了及时向这一方向发展。

苏联从50年代以来一直积极地发展超临界发电机组，1963年投运了第一台30万千瓦机组，锅炉参数为255大气压，主汽温度570℃和再热温度565℃。以后从25万千瓦到120万千瓦机组全部是用超临界压力的，其中25万千瓦机组用于热电站，其煤耗最低可达150克/度，即热效

率高达80%左右。苏联的超临界机组目前总数已超过180套，虽然在发展30万千瓦机组的初期由于锅炉下辐射区热负荷过大和采用立式上升下降管圈以及管子金属和焊接质量欠佳而经常发生爆管事故，但通过较长时间的改进，新设计的机组已相当成熟，可用率达到自然循环汽包炉的水平，炉膛水冷壁管采用一次或二次上升并有工质的复合循环，参数已改变为汽压255大气压，主汽温度和再热温度545℃，最近也有采用螺旋盘绕膜式水冷壁和整体焊接的膜式屏的报道。

西德在战前由西门子公司试制了临界参数的发电机组后，又制造了很多小型直流锅炉。战败后，西德的重型设备被折运到苏、美等国，由于缺少厚钢板和大型机器，西德的电力工业，便着重于制造直流锅炉和容量在10万千瓦左右的发电机组，最早的超临界发电机组在1954年正式在休斯电站投入运行，容量为8.5万千瓦，340巴，主汽温度610℃，两次再热温度都是560℃。至60年代初期容量才提高到15万~30万千瓦，并成为西德电力工业的主力机组。西德在发展15万千瓦机组时，认为这种较小容量的机组以采用200大气左右为宜，主汽温度及再热温度一般为530℃或535℃。至70年代，通过一次VGB会议，明确了超临界机组对提高电站经济性的必要性。采用超临界压力的大容量机组有1972年投运的1960吨/时锅炉，汽压290巴，汽温540/540℃，有休文电站的74万千瓦机组，汽压230巴，汽温530/535℃，还有曼哈姆电站的47万千瓦机组，汽压275巴，主蒸汽和两次再热汽温为530℃/540℃/530℃，于1983年投运，据称发电效率接近43%。这些超临界机组的可用率平均在85%左右，最好的约达92%。西德制造的超临界机组总共约28台左右，以小于15万千瓦的为多。

目前在西德流行的直流锅炉，一种是炉膛下部为螺旋盘绕的管圈、上部为垂直水冷壁的本生锅炉，可适用于亚临界或超临界参数；另一种为亚临界复合循环锅炉，前者在西德更为普遍流行。这种管圈的优点是：水冷壁管的根数少，即使采用较大的管径也能保证管内工质达到一定的重量流速，不采用内肋管也不会发生膜态沸腾，同时，热偏差小，不需要使用节流圈和中间混合集箱，可以避免汽水混合物的不均匀分配，也能适应易结焦的劣质煤。本生锅炉具有启动汽水分离器，加装低负荷循环泵后，启动负荷可以低至15%，而在负荷大于30%时可切除循环泵，锅炉以纯直流方式运行。循环泵有利于在启动时回收一部分热量，提高低负荷时的工质流速，使水冷壁能安全运行。这种锅炉还可以快速滑压启动和运行，简化启动系统，大量减少阀门的数量，对于启停的自动控制有利，故本生锅炉总的可靠性高、经济性好，完全适应变压变负荷运行和较宽广的煤种范围，虽然它也有炉膛水冷壁管水阻力大、水冷壁热膨胀较复杂，要求另用垂直支吊结构和制造和安装工时稍大等缺点，但世界上各大公司近年来还是愈来愈多地在采用该种技术与型式。

西德为了加强螺旋形管圈本生直流锅炉的优势，还发展了塔式结构和炉底燃烧器，以利于延长火焰行程，减少燃煤锅炉的磨损和避免在螺旋管圈膜式壁上开供燃烧器用的大孔。炉底也有采用倾斜垂直管制造以减少制造工时的。

日本是严重缺乏能源的国家，因而对研制热效率高的超临界发电机组不遗余力。自从由日立公司第一次引进的美国B & W公司的60万千瓦超临界机组作为姉崎电厂第一号机组在1967年投运后，隔了一年，日立便自制出一套同类型的机组，并于1969年在姉崎电厂投运，三菱、石川岛播磨，川崎公司也很快分别引进了美国的GE、FW和西德联合锅炉厂的技术，并开始制造超临界机组。通过实践与对比，日本三家较大的公司发现川崎引进的西德本生直流锅炉能经济地快速启停和变负荷运行，而美国的技术不能适应这种要求，便在70年代先后决

断地改引进螺旋盘绕水冷壁的直流锅炉技术,形成能变压运行的超临界机组。近年来,日本各厂基本上已停止生产美国技术的超临界机组而大量订货变压运行的超临界机组。日本由于采用引进技术与自行研究发展相结合的方针,超临界机组的发展速度在质与量两方面都很快。目前,45万千瓦及其以上的大容量发电机组全部是超临界参数的。日本虽引进过美国的技术,但由于精心设计,制造、维修和运行,并及时改变炉型结构,因此日本的超临界机组的可用率较高、信誉较好,没有象美国那样对采用超临界机组有过消极倒退现象,和持有超临界大容量机组的可靠性比亚临界较小容量机组低的论点。日本从1967年引进并投运了第一台超临界机组以来,至1981年的14年期间,制造并投运超临界机组约共62套,3615万千瓦,平均每年制造258万千瓦。近年来,日本各公司还积极进一步发展超临界机组的技术,例如三菱公司已签订了两台容量为100万千瓦的变压运行超临界机组的合同,打破了螺旋盘绕水冷壁锅炉不能适应超大容量机组的概念,另外又签订制作两台70万千瓦、有两次再热的超临界机组的合同,参数为316大气压,主汽与再热温度为566℃,估计这种参数机组的效率,可比169大气压机组提高约7.5%相当于发电效率约43%左右。日本电源开发公司和三菱公司,还计划通过认真的研究与发展,将超临界机组的参数,推进到352大气压,649/593/593℃,这样,效率估算可达到44~45%。日本对超临界火电机组的发展,充满着热情,预备既吸收美国过去制造的这类高参数机组的经验教训,又拟在这一领域,发展自己的技术,以求超过美国的水平。并认为在用煤为燃料的前提下,超超临界火电机组,将会胜过还在研究发展阶段的蒸汽燃气联合循环机组。

下表是日本电源开发公司计算的电厂效率数据,其中169公斤/厘米²一栏,是采用我国引进机组的数据。

蒸汽参数与电厂效率的关系数据

| 主汽压力(公斤/厘米 ²) | 169 | 246 | 316 | 316 | 352 |
|---------------------------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 主汽温度(°C) | 538 | 538 | 566 | 622 | 649 |
| 再热汽温(°C) | 538 | 538 | 566/566 | 593/593 | 593/593 |
| 汽耗(大卡/度) | 1917 | 1847 | 1779 | 1743 | 1726 |
| 汽机效率(%) | 44.86 | 46.56 | 48.34 | 49.34 | 49.83 |
| 锅炉效率(%) | 89.56 | 89.56 | 89.56 | 89.56 | 89.56 |
| 电厂损失(%) | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 发电效率(%) | 40.00 | 41.49 | 43.03 | 43.92 | 44.36 |
| 供电效率(%) | 37.2 | 38.6 | 40.00 | 40.84 | 41.25 |

我国早在1960年,曾设计制造了一台220吨/时的超高压直流锅炉,其炉膛水冷壁管是螺旋形盘绕上升的,在没有配备先进自动控制设备的情况下,十余年来运行良好,以后又制造了两台同类型的400吨/时直流锅炉和八台1000吨/时UP型直流锅炉。在60年代也曾设计制造了两台超临界直流锅炉试验台,可惜由于十年浩劫的干扰,未能进行试验研究工作。二十余年来,上海生产的直流锅炉经过使用实践和研究改进,已通过了初级发展阶段的考验,并在设计、制

造、试验研究、安装和运行方面积累了不少经验和技术资料,奠定了一定的基础。

为了使我国能早日发展和自制超临界直流锅炉,上海锅炉厂《锅炉技术》编辑组,特联合上海发电设备研究所、上海市电站设备公司和上海锅炉厂有志于发展超临界锅炉的同志,收集和翻译了美国、日本、西德和苏联的有关重点文章和资料共23篇,编成了这本《超临界参数锅炉》专辑(第一辑),内容包括超临界机组发展过程和发展趋向的综述,炉型结构,技术经济可行性分析,设计、试验研究、运转、自控、阀门等,在综述中还包括了材料、自控、水处理和其它技术问题。从这些文章的内容和我国电力工业当前情况和发展看,简单归纳为下列倾向性意见。

1· 由于燃料价格继续上涨,火力发电设备采用超临界参数机组,以大量节约能源的趋势在工业先进国家中已更加明显。我国燃料、材料、设备的价格有人为的不平衡,不利于经济分析,但能源、材料等价格在国际市场上是一定的,国外对超临界机组的技术经济分析可供我国参考与借鉴。

2· 参考国外和我国具体情况,我国首先在60万千瓦容量上发展超临界变压运行发电机组是适宜的,它有利于迅速扭转我国火电机组过去的参数低、容量小、煤耗高、投资大的缺点;减轻重型汽包、大口径下降管和重型厂房与设备的负担;也可在承担带中间负荷变压运行的任务时,提高机组起动、变负荷和低负荷运行的灵活性与经济性。初期参数可用250大气压、主汽和再热蒸汽温度用540℃,或两次再热温度540/540℃,在掌握了国外已成熟的技术后,进一步发展316~350大气压、两次再热的先进机组,也是必然的趋势,可争取在“九五”计划期间制造316大气压、540/550/565℃的超临界参数机组。

3· 在锅炉水冷壁管圈型式方面,应发展具有较高的可靠性,经济性和对燃料与负荷变化的适应性。目前各国制造的超临界锅炉,多数都采用水冷壁管螺旋盘绕上升的本生直流锅炉型式,便符合上述要求。这对于我国要大力节约能源、煤质品种多变、电网负荷峰谷差日益增大也是适宜的。这种炉型也适应我国有大量廉价的劳动力,将为我国发电设备在国际市场上的出口贸易,带来胜利。专辑中另外介绍了采用内螺纹管、能变压运行的垂直水冷壁管的超临界锅炉的方案,日本三菱公司并已签订了合同,拟制造一台这种型式的锅炉,在1987年投入运行。它能否适应我国有较宽广的煤种范围是值得怀疑的。

4、我国超临界机组的发展,已起步较晚,急需组织起来,“上下一致”,深入研究、分析和规划,并及时付诸行动。为了加快发展速度,应尽量利用国外已成熟的技术经验,引进技术,合作设计、合作生产,并与国内必须的试验研究相结合,则我国在“七五”计划期间,是可以制造出超临界机组,并投入运行、总结好经验,为“八五”计划期间批量生产的。从全国范围说,火电是2000年前电力供应的主流,超临界机组的生产,将为我国更快、更好、更省地制造出先进的火电设备,以满足国家电力急迫的需要,使不致因缺电而影响国民生产总值的增长和人民生活水平的提高。从这个意义上说,它是我国带根本性的战略任务,不能不重点抓好。我国发电设备制造队伍总数是庞大的,在现有生产计划中增加这一任务,还可力能胜任。超临界火电机组的迅速、顺利发展,将为我国发电设备水平赶上国际先进行列和我国经济的进一步跃进奠定基础,作出重大贡献。

《超临界参数锅炉》(第一辑)的编辑出版工作在时间上比较仓促,内容也不够完备。《超临界参数锅炉》(第二辑)估计在1985年可出版,可供读者进一步参阅。

最后,向热心参加“专辑”工作的各位同志致以衷心的感谢。

主编 杨立洲

日本超临界直流锅炉

上海发电设备所 张忠义

绪 言

为了加快电力建设速度,世界各国火力发电均向大容量方向发展。随着机组容量的不断增大,蒸汽参数也力求提高。提高初参数可提高机组循环效率、降低热耗。采用超临界参数后,蒸汽比容较小,在一定的条件下还可减小主蒸汽管道及汽机尺寸,有利于大容量汽机的发展。鉴于上述原因,世界各主要工业国家均发展了超临界火电机组。

日本超临界机组起步并不早,64年才开始发展该种机组。虽然美国在60年代超临界机组的发展一度停顿,与之相反,日本却一直致力于超临界机组的发展,每年均有该种机组投入运行。这主要由于日本燃料几乎全部进口,价格昂贵所致。并且日本钢材价格又较其它国家低廉,为该种机组发展提供有利条件。

日本的发展经验可供借鉴,但我国情况与之不同,从一开始就应充分利用国外已有经验,结合我国国情,周密计划,然后稳妥而又积极地发展超临界机组。

日本的锅炉发展概况^{[1]-[7][5]}

1. 锅炉发展简史

日本在战前1934年于关西电力公司尼崎第二电厂投运一台利用日本本国技术制造的机组,蒸汽压力为43公斤/厘米²、汽温为445℃、汽轮发电机为7.5万千瓦,配两台200吨/时锅炉。

战后一开始制造的汽机、锅炉部份的部件与欧美各公司合作生产,但当时各公司还主要以自己的技术为基础进行制造。

九州电力港第二电厂为1947年战后最初新建的日本国产机组,蒸汽压力为40公斤/厘米²、汽温为435℃、汽轮发电机为5.4万千瓦,配两台170吨/时锅炉。当时美国已迅速发展大容量机组,发展126公斤/厘米²等级的机组取代100公斤/厘米²等级的机组,并有几台169公斤/厘米²等级的机组在运行,汽温绝大多数为538/538℃,少数为566/538℃。

当时日本还没有一台再热机组,与欧美各国相比无论在容量上或者蒸汽参数上均较落后。因此各公司自1951年起决心与欧美各先进公司进行技术合作(见表1)。同时各电力公司输入大容量高效率的美国高参数机组作为先行机组,从该时期起日本火电机组获得了迅速发展。

当时新安装的第一台高参数机组往往为引进机组,第二台为国产机组。表2表示57年以后日本第一台机组的投运情况。由于以引进机组为先行机组,使各公司能有充分的时间进行技术开发,以便提高以后设备的可靠性,同时积累了运行经验,增强了信心。所以引进机组对日本的技术进步起了很大作用。由图1可见引进机组与国产机组的关系以及蒸汽参数、单机容量的发展。至1960年日本生产机组容量已达26.5万千瓦,蒸汽参数169公斤/厘米²、

566/538℃,技术上也获得显著进步。但是应该指出:从外国公司引进技术之前,日本的原有技术已有一定基础,正因为本国的技术具有一定水平,才能有效地促进上述技术合作的发展。

表 1 技术合作的公司间许可证日期

| 公司名称 | 外国公司名称 | 许可证日期 |
|--|-------------------------|-----------|
| 三菱重工 | Combustion Engineering | 51年5月16日 |
| | Westinghouse | 52年2月28日 |
| | Sulzor Brothers | 62年6月2日 |
| 日本制作所 拔柏葛日立 东 芝 石川岛播磨 川崎重工 富士电机 | General Electric | 52年12月12日 |
| | Babcock & Wilcox | 53年1月20日 |
| | General Electric | 52年2月8日 |
| | Foster Wheeler | 52年4月2日 |
| | Vereinigte Kessel Werke | 52年10月14日 |
| | Siemens | 55年12月16日 |

表 2 引进的第一台高参数的机组

| 电 厂 | 出 力 (万千瓦) | 投运 年份 | 蒸汽压力 (公斤/厘米 ²) | 蒸汽温度 (°C) | 制 造 厂 | |
|-------------|--------------|----------|-------------------------------|--------------|--------------|-----|
| | | | | | 汽 轮 发 电 机 | 锅 炉 |
| 东京电力·千叶1号 | 12.5 | 57 | 127 | 538/538 | GE | CE |
| 中部电力·新名古屋1号 | 15.6 | 58 | 169 | 566/538 | GE | CE |
| 东京电力·千叶8号 | 17.5 | 58 | 169 | 566/538 | GE | B&W |
| 中部电力·新名古屋2号 | 22.0 | 59 | 169 | 566/539 | GE | 三 菱 |
| 东京电力·横须贺1号 | 26.5 | 60 | 169 | 566/538 | GE | 三 菱 |
| 东京电力·横须贺3号 | 35.0 | 64 | 169 | 566/538 | GE | CE |
| 中部电力·尾鷲1号 | 37.5 | 64 | 169 | 566/538 | GE | CE |
| 关西电力·姬路第二4号 | 45.0 | 68 | 246 | 538/552/566 | GE | CE |
| 中部电力·知多8号 | 50.0 | 68 | 246 | 538/538 | GE | 三 菱 |
| 东京电力·姉崎1号 | 60.0 | 67 | 246 | 538/566 | GE | B&W |
| 东京电力·鹿岛5号 | 100.0 | 74 | 246 | 538/566 | GE | 三 菱 |

2. 日本超临界机组的发展

日本各公司很早就对超临界锅炉进行了研究。例如日立制作所于1957年组成综合委员会对美国超临界机组进行了全面调查，于1960年10月建成一台2吨/时、350公斤/厘米²、650℃的试验锅炉。石川岛播磨公司于1960年建成一台13吨/时、380公斤/厘米²、600℃的试验锅炉。三菱重工于1964年在长崎研究所建成一台2吨/时、350公斤/厘米²、470℃超临界复合循环试验装置，此外还在神户研究所建立一台5吨/时、350公斤/厘米²、650℃超临界复合循环试验锅炉。同时还在长崎研究所建立了一台超临界压力给水处理试验管圈，在九州大学中建立一个传热试验管圈。

在这些试验装置上进行了下述试验：
管内传热、阻力特性及各部温度分布；
管内结垢情况及水质影响；
启动及运行特性；
自动控制特性；
材料的持久强度等。

在这些试验装置上摸清了超临界机组一些主要特性。还于1964年先引进UP型亚临界直流锅炉。第一批机组为东京电力五井电厂2号机组(26.5万千瓦)及关西电力姬路第二电厂2号机组(32.5万千瓦)。日本第一台本生型亚临界直流锅炉为九州电力大村电厂2号机组(15.6万千瓦)。

日本于1960年开始探讨超临界机组的生产，1964年1月21日由资源调查会会长向科学技术长官提出采用超临界压力火力发电的建议，按照这个建议确认了采用246公斤/厘米²、538/538℃的参数。1965年起开始制造超临界机组。

1967年东京电力姉崎电厂1号机组投入运行，它为日本第一台引进的超临界机组，容量为60万千瓦，参数为246公斤/厘米²、538/566℃。1968年中部电力知多电厂3号机组50万千瓦投入运行，它为日本第一台国产机组。接着是关西电力姬路第二电厂4号机组45万千瓦于1986年投入运行，它为二次再热机组。中部电力知多电厂4号机组70万千瓦于1974年投入运行，同年9月东京电力鹿岛电厂5号机组100万千瓦投入运行，其汽机为引进的，锅炉为国产的。这两台均是当时日本最大容量的超临界机组。1975年东京电力6号机组及袖浦电厂2号机组各一台100万千瓦超临界机组投入运行。由于日本超临界机组获得迅速发展，至1980年超临界机组已占总发电设备容量的40%。至1983年底的统计已投运72台超临界机组，总容量约4200万千瓦。表3表示日本于1983年前投运超临界机组一览表。

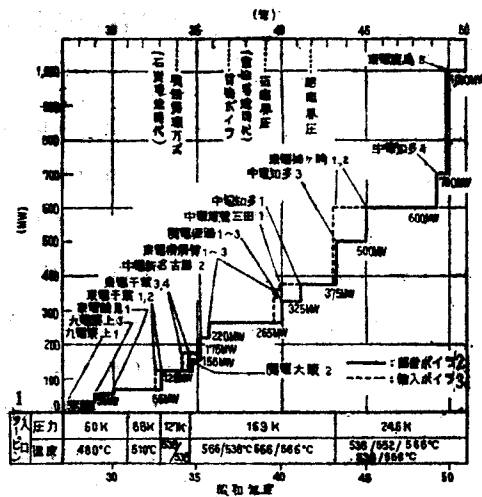


图1 引进与国产机组的关系及蒸汽参数与单机容量的发展
1—汽机入口；2—国产锅炉；
3—引进锅炉

表 3

1981年前已投运超临界机组一览表

| 年份 | 电力公司 | 电厂 | 机组编号 | 汽 机 | | | | 锅 炉 | | | | 投运月日 |
|----|------|------|------|-----------|----------------------------|--------------------|------|-----------|--------------|----------|-----------|-------|
| | | | | 容量 万千瓦 | 入口压力 公斤/厘米 ² | 入口汽温 ^{°C} | 制造厂 | 容量 吨/时 | 形 式 | 燃料 | 制造厂 | |
| 67 | 东京电力 | 姉崎 | 1 | 60 | 246 | 538/566 | GE | 1950 | 直 流 | 油 | B&W | 12.1 |
| 68 | 关西电力 | 姬路第二 | 4 | 45 | 246 | 538/552/566 | WE | 1320 | 直 流 (双炉膛) | 油 | CE | 3.6 |
| | 中部电力 | 知多 | 3 | 50 | 246 | 538/538 | GE | 1700 | " | 油 | 三菱重工 | 3.27 |
| 69 | 东京电力 | 姉崎 | 2 | 60 | 246 | 533/566 | 东芝 | 1950 | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 11.21 |
| 70 | 关西电力 | 海南 | 1 | 45 | 246 | 538/552/566 | 东芝 | 1380 | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 5.29 |
| | " | " | 2 | " | " | " | " | " | " | 油 | " | 9.29 |
| 71 | 东京电力 | 鹿岛 | 1 | 60 | 246 | 538/566 | 日立 | 1950 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 3.19 |
| | 中部电力 | 渥美 | 1 | 50 | 246 | 538/538 | 东芝 | 1700 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 6.11 |
| | 东京电力 | 姉崎 | 3 | 60 | 246 | 538/566 | " | 1950 | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 6.24 |
| | 关西电力 | 高砂 | 1 | 45 | 246 | 538/552/566 | 日立 | 1380 | 直 流 | 油 | 三菱重工 | 9.18 |
| | 东京电力 | 鹿岛 | 2 | 60 | 246 | 538/566 | 三菱重工 | 1950 | 直 流 | 油 | 石川岛 播磨 | 9.23 |
| | 中部电力 | 渥美 | 2 | 50 | 246 | 538/538 | 东芝 | 1700 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 10.29 |
| | 关西电力 | 高砂 | 2 | 45 | 246 | 538/552/566 | 三菱重工 | 1380 | 直 流 | 油 | " | 10.29 |
| 72 | 东京电力 | 鹿岛 | 3 | 60 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1950 | 直 流 (双炉膛) | 油 | " | 2.4 |
| | " | " | 4 | " | " | " | 三菱重工 | " | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 4.7 |
| | 四国电力 | 坂出 | 2 | 35 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1195 | " | 油 | 三菱重工 | 5.19 |
| | 东京电力 | 姉崎 | 4 | 60 | 246 | 538/566 | 日立 | 1950 | " | 油 | 石川岛 播磨 | 9.28 |
| 73 | 四国电力 | 坂出 | 3 | 45 | 246 | 538/566 | 日立 | 1510 | " | 油 焦炉气 | 三菱重工 | 4.7 |
| | 关西电力 | 海南 | 4 | 60 | 246 | 538/552/566 | 东芝 | 1850 | " | 油 | 拔柏葛 日立 | 6.17 |
| | 九州电力 | 唐津 | 3 | 50 | 246 | 538/538 | " | 1710 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 6.29 |
| | 东北电力 | 新仙台 | 2 | 60 | 246 | 566/538 | " | 1940 | " | 油 | " | 6.30 |
| | 关西电力 | 姬路第二 | 5 | 60 | 246 | 538/552/566 | 三菱重工 | 1780 | " | 油 | " | 10.3 |
| | 关西电力 | 姬路第二 | 6 | 50 | 246 | 538/552/566 | 日立 | 1780 | 直 流 | 油 | 石川岛 播磨 | 11.17 |
| | 东京电力 | 大井 | 3 | 35 | 250 | 538/538 | KWC | 1200 | 直 流 变压 | 油 | 川崎重工 | 12.20 |

续表 3

| 年份 | 电力公司 | 电厂 | 机组编号 | 汽 机 | | | 锅 炉 | | | | 投运月日 | |
|----|------|-----------|------|-----------|----------------------------|-------------|----------|-----------|--------------|-----|-----------|-------|
| | | | | 容量 万千瓦 | 入口压力 公斤/厘米 ² | 入口汽温 °C | 制造厂 | 容量 吨/时 | 形 式 | 燃 料 | | 制造厂 |
| 74 | 中部电力 | 知多 | 4 | 70 | 246 | 538/538 | 东芝 | 2300 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 3.15 |
| | 关西电力 | 海南 | 3 | 60 | 246 | 539/552/566 | 三菱 重工 | 1850 | " | 油 | " | 4.27 |
| | 中国电力 | 玉岛 | 3 | 50 | 246 | 538/538 | 日立 | 1710 | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 6.28 |
| | 四国电力 | 坂出 | 4 | 35 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1150 | " | 油 | 三菱重工 | 5.31 |
| | 九州电力 | 川内 | 1 | 50 | 246 | 538/538 | 三菱 重工 | 1710 | " | 油 | 石川岛 播磨 | 7.2 |
| | 东京电力 | 袖浦 | 1 | 60 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1900 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 8.1 |
| | " | 鹿岛 | 5 | 100 | 246 | 538/566 | GE | 3180 | " | 油 | " | 92.8 |
| | 中部电力 | 西名 古屋 | 5 | 50 | 246 | 538/566 | 日立 | 1700 | 直 流 | 油 | " | 10.4 |
| 75 | 北陆电力 | 富士 新港 | 1 | 50 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1700 | " | 油 | 石川岛 播磨 | 10.18 |
| | 中部电力 | 西名 古屋 | 6 | 50 | 246 | 538/538 | 东芝 | 1700 | " | 油 | " | 4.11 |
| | 四国电力 | 阿南 | 3 | 45 | 246 | 538/566 | 日立 | 1490 | " | 油 | 三菱重工 | 6.13 |
| | 东京电力 | 鹿岛 | 6 | 100 | 246 | 538/566 | GE | 3180 | " | 油 | 拔柏葛 日立 | 6.27 |
| 76 | " | 袖浦 | 2 | 100 | 246 | 538/566 | 东芝 | 3180 | 直 流 (双炉膛) | 气 | 三菱重工 | 9.27 |
| | 九州电力 | 相浦 | 新工 | 50 | 246 | 538/538 | 东芝 | 1720 | 直 流 (双炉膛) | 油 | 三菱重工 | 10.1 |
| | 四国电力 | 阿南 | 4 | 45 | 246 | 538/566 | " | 1490 | 直 流 | 油 | 石川岛 播磨 | 12.7 |
| 77 | 东京电力 | 袖浦 | 3 | 100 | 246 | 538/566 | 日立 | 3110 | 直 流 | 气 | 拔柏葛 日立 | 2.10 |
| | " | 姉崎 | 5 | 60 | 246 | 538/566 | 日立 | 1930 | 直 流 (双炉膛) | 气 | 三菱重工 | |
| | " | 东新泻 | 1 | 60 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1980 | " | 油气 | " | 6.10 |
| | 关西电力 | 多奈川 第二 | 1 | 60 | 246 | 538/552/566 | 日立 | 1780 | " | 油 | " | 7.15 |
| | " | " | 2 | " | " | " | " | " | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 8.20 |
| | 九州电力 | 丰前 | 1 | 50 | 246 | 538/538 | 东芝 | 1750 | " | 油 | 石川岛 播磨 | 12.3 |

续表 3

| 年份 | 电力公司 | 电厂 | 机组编号 | 汽 机 | | | | 锅 炉 | | | | 投运月日 |
|----|------|----------|------|-----------|----------------------------|------------|----------|-----------|--------------|---------|-----------|---------------------------------|
| | | | | 容量 万千瓦 | 人口压力 公斤/厘米 ² | 人口汽温 °C | 制造厂 | 容量 吨/时 | 形 式 | 燃料 | 制造厂 | |
| 78 | 中部电力 | 知多 | 5 | 70 | 246 | 538/538 | 东芝 | 2300 | 直流 | 气 | 拔柏葛 日立 | 3.3 |
| | " | " | 6 | " | " | " | " | " | " | " | " | 4.28 |
| | 九州电力 | 新小仓 | 3 | 60 | 246 | 538/538 | " | 2030 | " | " | 三菱重工 | 9.29 |
| 79 | 东京电力 | 姉崎 | 6 | 60 | 246 | 538/566 | 日立 | 1930 | 直 流 | 气 | 拔柏葛 日立 | 10.26 |
| | " | 袖浦 | 4 | 100 | 246 | 538/566 | 三菱 重工 | 3170 | 直 流 (双炉膛) | 气 | 三菱重工 | 9.1 |
| | 中国电力 | 下松 | 3 | 70 | 246 | 538/566 | 东芝 | 2350 | 直 流 | 油 | 石川岛 播磨 | 9.14 |
| | 九州电力 | 新小仓 | 4 | 60 | 246 | 538/538 | " | 2020 | " | 气 | 三菱重工 | 6.1 |
| 80 | 东北电力 | 秋田 | 4 | 60 | 246 | 538/566 | 东芝 | 1940 | 直 流 | 油 | 三菱重工 | 7.11 |
| | 东京电力 | 广野 | 1 | 60 | 246 | 538/538 | " | 1950 | 直流变压 | 油 | 石川岛 播磨 | 4.18 |
| | " | " | 2 | 60 | 246 | " | " | " | " | 油 | 日 立 | 7.11 |
| | 九州电力 | 丰前 | 2 | 50 | 246 | 538/538 | " | 1750 | 直 流 | 油 | 拔柏葛 日立 | 6.6 |
| 81 | 电源开发 | 松岛 | 1 | 50 | 246 | 538/538 | 日立 | 1640 | 强制直流 | 煤油 | 三菱重工 | 1.16 |
| | 中部电力 | 渥美 | 3 | 70 | 246 | 538/566 | 东芝 | 2300 | 直 流 | 油 | " | 5.15 |
| | " | " | 4 | " | " | " | " | " | " | " | " | 6.26 |
| | 北陆电力 | 富山 新港 | 2 | 50 | 246 | 538/566 | " | 1690 | " | 油 | 石川岛 播磨 | 11.1 |
| | 中国电力 | 岩国 | 3 | 50 | 246 | 538/566 | 三菱 重工 | 1730 | 强制直流 | 油 | 三菱重工 | 81.9.30 (油) 82.3.3 (气) |
| | 电源开发 | 松岛 | 2 | 50 | 246 | 538/538 | 东芝 | 1640 | 强制直流 | 油气 | 三菱重工 | 6.19 |
| 83 | 中部雷力 | 知多 第二 | 1 | 70 | 246 | 538/566 | 东芝 | 2300 | 直流变压 | 天然气 | 拔柏葛 日立 | 9.9 |
| | 电源开发 | 竹原 | 3 | 70 | 246 | " | 日立 | 2300 | 直流变压 | 煤 | " | 3 |
| | 常磐共同 | 勿来 | 7 | 60 | 246 | 538/566 | 日立 | 1940 | 直流变压 | 重油 煤 | 三菱重工 | 9.9 |

表 4

计划及正在安装的超临界机组一览表

| 电力公司 | 电 厂 | 机 组 编 号 | 汽 机 | | | 锅 炉 | | | 投 运 日期 | |
|-------|------|------------------|------------------|---|------------------------|---------------|-----------------------|------------------|-----------|-------|
| | | | 容 量 千 瓦 | 入 口 压 力 公 斤 厘 米 ² | 入 口 汽 温 °C | 制 造 厂 | 容 量 吨 / 时 | 形 式 | | 燃 料 |
| 北海道电力 | 苫东厚真 | 2 | 60 | 246 | 538/566 | 日立 1920 | 直流变压 | 煤 | 石川岛播磨 | 85.9 |
| " | 知 内 | 1 | 35 | 246 | 538/566 | 日立 1130 | 直流变压 | 重, 原油 | 三菱重工 | 83.12 |
| " | 知 内 | 2 | 35 | 246 | 538/566 | 东芝 1130 | 直流变压 | 重, 原油 | 石川岛播磨 | 84 |
| 东北电力 | 东新潟 | 2 | 60 | 246 | " | 日立 1940 | 直 流 | 天然气 重原油 | " | 84.2 |
| 常磐共同 | 勿 来 | 9 | 60 | 246 | " | 东芝 " | 直流变压 | 重油煤 | " | 83.12 |
| 东京电力 | 广 野 | 3 | 100 | 246 | " | " 3190 | " | 重原油 天然气 | 三菱重工 | 86.1 |
| 中部电力 | 知多第二 | 2 | 70 | 246 | " | " 2300 | " | 天然气 | 石川岛播磨 | 83.11 |
| 关西电力 | 御 坊 | 1 | 60 | 246 | " | 三菱 重工 1950 | " | 重, 原油 | 三菱重工 | 84.10 |
| " | " | 2 | 60 | 246 | " | 日立 " | " | " | 拔柏葛日立 | 84.12 |
| " | " | 3 | 60 | 246 | " | 东芝 " | " | " | 三菱重工 | 85.4 |
| 中国电力 | 大 崎 | 1 | 50 | 246 | " | 日立 1730 | " | 重原油 液化丙 烷气 | 拔柏葛日立 | 88.11 |
| " | 新小野田 | 1 | 50 | 246 | " | 东芝 1670 | " | 煤重油 | 石川岛播磨 | 86.7 |
| " | " | 2 | 50 | 246 | " | " 1670 | " | " | " | 87.5 |
| 九州电力 | 川 内 | 2 | 50 | 246 | " | 三菱 重工 1700 | " | 重原油 天然气 | " | 85.10 |

由表 2 可见日本一般以 45—50 万千瓦为超临界机组使用的分界线, 容量更大时差不多全采用超临界机组。日本超临界机组常用参数为 246 公斤/厘米²、538/538℃ 或 538/566℃, 二次再热时则采用 538/552/566℃。

由于机组向大容量高参数发展, 电厂经济性有了很大提高。如发电效率由 1951 年的 18.68% 提高至 1980 年 38.17%; 供电效率由 17.21% 提高至 36.45%, 均约提高 1 倍以上, 见图 2。

自从经过1973年及1979年二次石油危机后，日本在确立以节能为基本方针的前提下，建议以煤及原子能为基础的能源多样化的方针。火力发的燃料将从以油为主逐步过渡到以煤为主，预计至1986年新建机组几乎全部以煤作为燃料(见图3)。

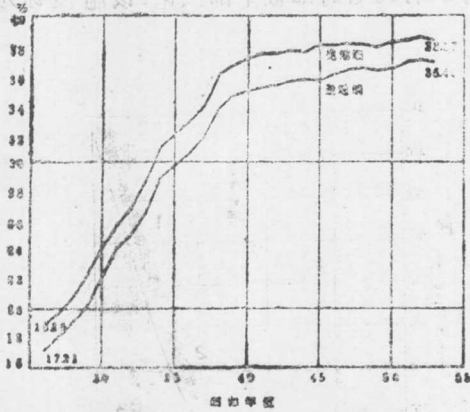


图 2 电厂热效率提高情况

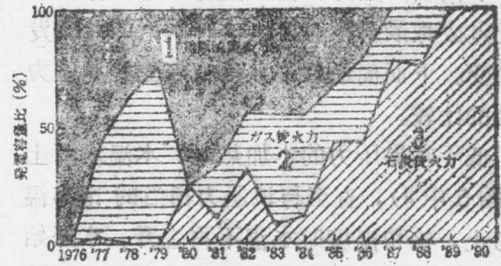


图 3 预计的各种燃料比例
1—燃油；2—燃气；3—燃煤

日本自1973年起,开始积极发展螺旋管圈变压运行机组,首先于1973年12月20日大井电厂3号机组35万千瓦投入运行,接着1980年广野电厂1号及2号机组60万千瓦投入运行,目前各公司均积极发展变压运行机组,如图4所示。以后新建的火电机组几乎全为变压运行机组,不单是燃油即使是燃煤的超临界机组也将具有变压运行功能。

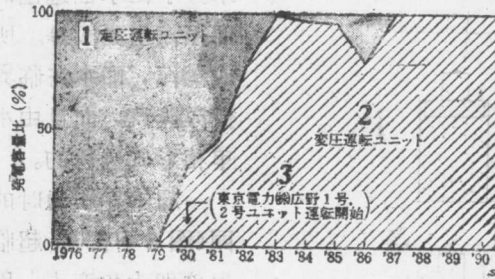


图 4 预计的发电方式容量比

- 1—定压运行机组；
- 2—变压运行机组；
- 3—东京电力广野电厂1号、2号机组开始运行

超临界压力时工质主要特性^{[8][9][10]}

随着压力的提高,水的饱和温度也相应增加,汽化潜热却相应减少,饱和水与饱和蒸汽的比重差也随之减少。在压力达到 225.56 公斤/厘米²时,汽化潜热等于零,汽水比重差也等于零。该压力称为临界压力。水在该压力下加热至 374.15℃时即被全部汽化,该温度称为临界温度。

水在临界压力、临界温度附近,存在着相变点或称最大比热区,这时水汽的性质发生剧变。下面简述超临界压力与亚临界压力特性的比较。

低于临界压力的水加热时,水温逐渐上升(图 5 中 a),直至与该压力相当的饱和温度为止,饱和温度时水温不再上升,水开始蒸发,同时形成水与蒸汽分离的水面(同图 b),蒸发结束后,蒸汽温度继续上升,变成过热蒸汽(同图 c)。

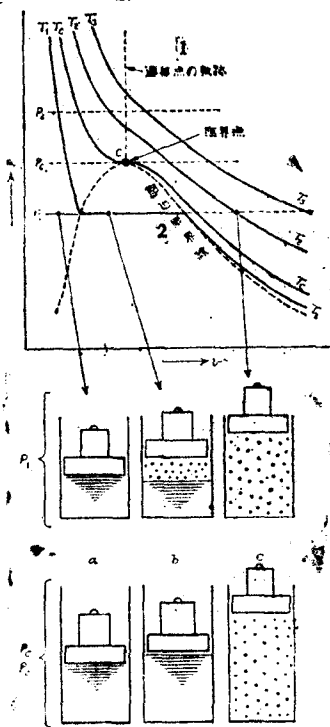


图 5 亚临界与超临界压力时蒸汽的产生
1—相变点的轨迹; 2—饱和范围线

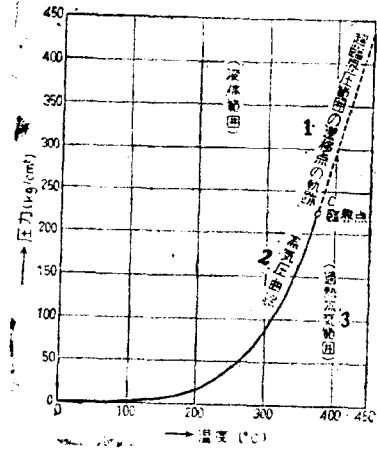


图 6 超临界压力相变点的轨迹
1—超临界压力时相变点的轨迹;
2—饱和温度线; 3—过热蒸汽区域

当压力 p_1 逐渐上升至临界压力 p_c (225.56 公斤/厘米²), 水与蒸汽密度相等。水分子由水面逸出时, 其下部水的引力与上部蒸汽引力相等。所以没有汽化潜热水就变成蒸汽, 即水在临界压力时没有蒸发现象即变成蒸汽。而且由水变成蒸汽是连续的, 以单相形式进行的。

超临界压力时的情况与临界压力情况相同(图 5 下部)。超临界压力下水变成蒸汽的温度即为相变点。图 6 中虚线近似地表示相变点与压力的关系。它与饱和温度曲线的延长部分大致圆滑相接。

图 7 及图 8 分别表示比容 v 及热焓与温度的关系。亚临界压力时在饱和温度处蒸发, 比容及热焓以垂直线形式急剧上升。而

在临界及超临界压力时虽然无蒸发现象，但在相变点附近比容及热焓增加最快。该点成为拐点，它近似地相应于图6中虚线上的点。在相同温度条件下对超临界压力蒸汽与亚临界压力蒸汽进行对比发现：超临界压力蒸汽热焓随着压力增加而降低的幅度不及亚临界压力时明显；但比容降低仍然非常明显。

图9表示超临界压力范围内定压比热的变化情况。超临界压力水的比热随着温度上升而上升，蒸汽特性恰巧相反，相变点处比热最大。

图10表示在不同压力及温度条件下导热系数的变化情况，相同温度时随着压力增加导热系数也有所升高。

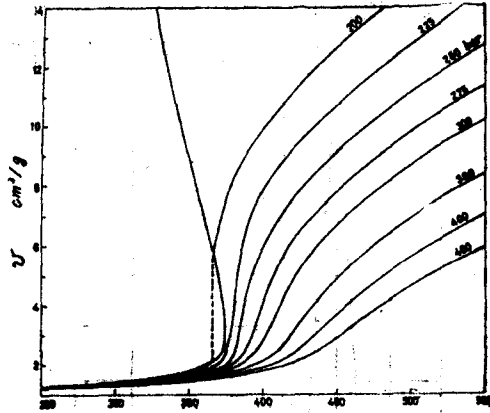


图7 比容 v 与温度 t 的关系

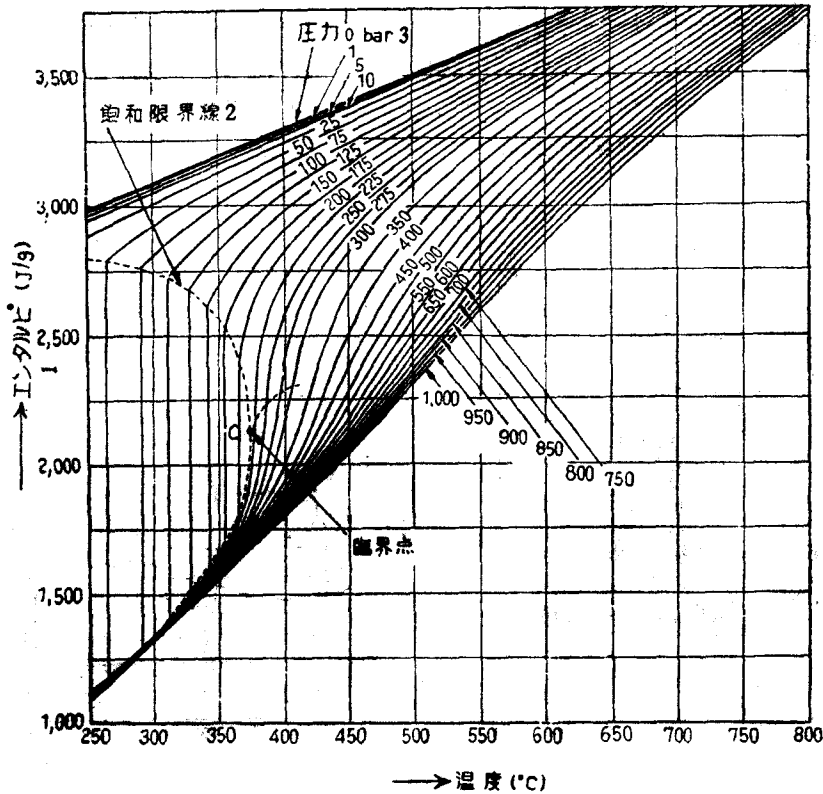


图8 热焓与温度的关系

1—热焓(焦/克); 2—饱和线; 3—巴